Aus der Orthopädischen Klinik
der Universität Düsseldorf

ZUR BIOMECHANIK DES LUMBALEN BEWEGUNGSSEGMENTES BEI SCHRITTWEISER ABTRAGUNG DES WIRBELBOGENS

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Ralf Mai

1979

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544328_0007

Aus der Orthopädischen Klinik
der Universität Düsseldorf

ZUR BIOMECHANIK DES LUMBALEN BEWEGUNGSSEGMENTES BEI SCHRITTWEISER ABTRAGUNG DES WIRBELBOGENS

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät der
Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Ralf Mai

1979

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Referent : Prof. Dr. med. habil. Krämer, Orthopädische Klinik
Koreferent: Prof. Dr. med. Günther, Strahlenklinik

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität Düsseldorf

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
EINLEITUNG	1
I. ALLGEMEINER TEIL	
1. Vorbemerkungen zur Anatomie und Physiologie des lumbalen Bewegungssegmentes	3
2. Mechanik des Bewegungssegmentes	8
II. SPEZIELLER TEIL - EIGENE UNTERSUCHUNGEN	
1. Anmerkungen zur Fragestellung der vorliegenden experimentellen Studie	11
2. Ausführung der Versuche	17
3. Versuchsauswertung	31
4. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	52
5. Diskussion	59
6. Zusammenfassung	62
III. ANHANG	
Literaturverzeichnis	64

EINLEITUNG

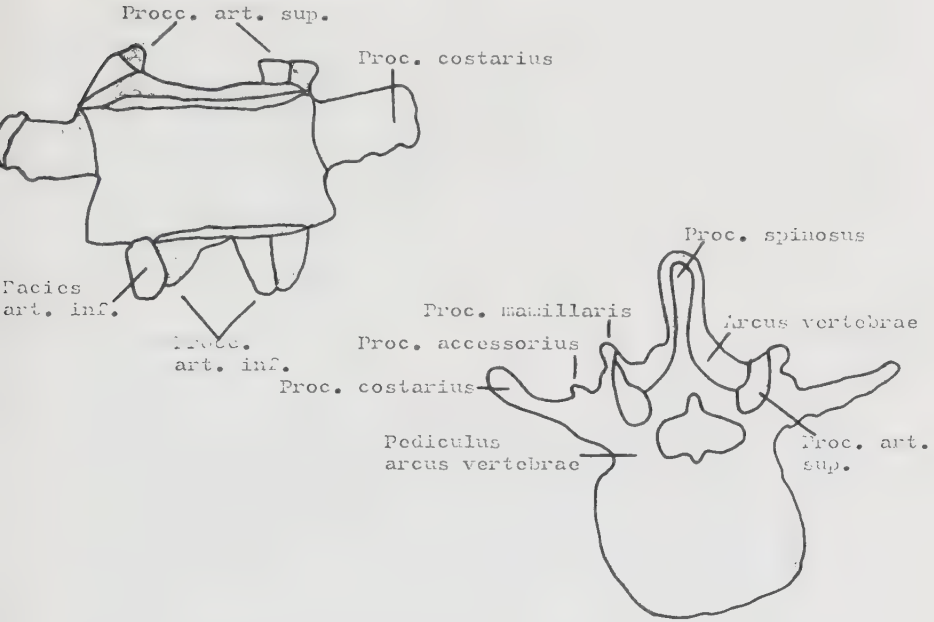
Die vorliegende experimentelle Arbeit befaßt sich mit einem Problem, welches bereits seit längerer Zeit Orthopäden,Neurologen und Neurochirurgen beschäftigt, das heißt alle Kliniker, die, aus welcher Indikation auch immer, einen Zugang zum Rückenmark, zur Cauda equina oder zur Bandscheibe benötigen. Die dazu notwendige Eröffnung des Wirbelkanals macht die Entfernung des hinteren Wirbelbogenanteils entweder nur einseitig (zwischen Dornfortsatz und Gelenkfortsatz = Hemilaminektomie) oder beidseitig (zwischen den beiden Gelenkfortsätzen = Laminektomie) erforderlich. Wird ein noch größerer Zugang benötigt, so kann auf einer oder auch auf beiden Seiten der Wirbelbogen bis zur Bogenwurzel abgetragen werden. Da in diesem Falle auch eine oder beide Gelenkfacetten mitentfernt werden müssen, wird hierbei die Kontinuität zwischen den beiden Wirbeln nur noch durch die Bandscheibe sowie die Ligg. longitudinalia anteriora et posteriora erhalten. Da die Patienten postoperativ im Rahmen der Rehabilitation auch wieder teilweise oder ganz ins Berufsleben integriert werden, das heißt ihre Wirbelsäule denselben Belastungen aussetzen wie vor der Operation, stellt sich die Frage, wie die Wirbelsäule in mechanischer Hinsicht auf den Wegfall der dorsalen Bänder und eventuell der kleinen Wirbelgelenke reagiert. Die Fragestellung der nachfolgenden Arbeit lautet also: Ist die Bandscheibe zusammen mit den beiden Längsbändern in der Lage, die zusätzliche Belastung durch den teilweisen oder völligen Wegfall des Wirbelbogens in rein mechanischer Hinsicht zu verkraften? Kommt es unter Belastung zum Auftreten von Bandscheibenvorfällen, zu Verschiebungen der Wirbelkörper gegeneinander oder gar zum Abgleiten zweier Wirbelkörper voneinander?

Es wurden 27 Bewegungssegmente der Lendenwirbelsäule frischverstorbener Patienten im Alter zwischen 17 und 67 Jahren untersucht. Nach exakter Darstellung der knöchernen Strukturen wurden die Präparate unter schrittweiser Abtragung des Wirbelbogens den

vier beim Menschen physiologischen Belastungsarten ausgesetzt. (Symmetrische Kompression, Lordose, Kyphose, Seitkantenbelastung). Zur Kontrolle des Kompressionseffektes und eventueller morphologischer Veränderungen wurden die Präparate vor und nach der Kompression röntgenologisch untersucht und die Zwischenwirbelräume exakt vermessen.

I. ALLGEMEINER TEIL :

1. Vorbemerkungen zur Anatomie und Physiologie des lumbalen Bewegungssegmentes



Die menschliche Lendenwirbelsäule besteht aus fünf Wirbeln mit großen, querovalen Wirbelkörpern, dreieckigen, relativ großen Foramina vertebralia sowie hohen, nach hinten gerichteten, seitlich abgeplatteten Dornfortsätzen. Die seitlichen Fortsätze entspringen vor den Gelenkfortsätzen und stellen Rippenrudimente dar; sie heißen daher Processus costarii. Sie werden vom 1. - 5. Lendenwirbel zunehmend länger und dann allmählich wieder kürzer. Die medialwärts gerichteten Gelenkflächen der kranialen Gelenkfortsätze stehen senkrecht und sind von ventral nach dorsal konkav. Die kaudalen Gelenkfortsätze stehen näher zueinander, ihre Gelenkflächen weisen nach lateral und sind konvex. So umfassen die kranialen Gelenkfortsätze die kaudalen des nächst-

höheren Wirbels. Die Stellung der Gelenkflächen gestattet in der Hauptsache eine Beugung und Streckung und eine gewisse Seitwärtsneigung, die hauptsächlich in den Segmenten L 3 / L 4 sowie L 4 / L 5 erfolgt. Zwischen dem oberen Gelenkfortsatz und der Wurzel des Processus costarius liegt der kleine Proc. accessorius, der dem Proc. transversus der Brustwirbel entspricht. Bei den oberen Lenden- und den unteren Brustwirbeln findet sich am hinteren freien Rande des kranialen Gelenkfortsatzes der Proc. mamillaris. Der Körper des 5. Lendenwirbels ist vorn gewöhnlich etwas höher als hinten. Weiterhin ist an ihm der Abstand der oberen und der unteren Gelenkfortsätze gleich.

Neben den Gelenkfortsätzen stellt auch der Bandapparat der Wirbelsäule die Kontinuität der einzelnen Bewegungssegmente sicher und sorgt für eine Erhöhung der Stabilität. Im einzelnen sind dies

Ligamentum longitudinale anterius et posterius.
Diese Bandmassen ziehen 1. ventral und lateral und 2. dorsal über Wirbelkörper und Zwischenwirbelscheiben hinweg. Das breitere vordere Band ist an den Wirbelkörpern, das hintere schmalere Band an den Zwischenwirbelscheiben verankert.

Ligamenta flava.
Sie bestehen aus gelben, vorwiegend elastischen Fasern und verbinden die Wirbelbögen benachbarter Wirbel. Sie sind schon in Ruhestellung der Wirbelsäule gespannt; werden sie bei Beugung noch stärker gedehnt, so speichern sie Energie, die beim Nachlassen der beugenden Kräfte die Wirbelsäule wieder in ihre Ausgangslage zurückführt.

Ligamenta interspinalia.
Sie verlaufen von ventrokranial nach dorsokaudal zwischen benachbarten Dornfortsätzen.

Ligamentum supraspinale.
Es verläuft vom 7. Halswirbel bis zum Kreuzbein über die Spitzen der Proc. spinosi und ist mit den vorgenannten verbunden.

Des weiteren wird die Kontinuität im Bereich der Lendenwirbelsäule durch die Zwischenwirbelgelenke sichergestellt. Sie besitzen sagittal stehende Gelenkflächen, die im LWS-Gebiet eine Beugung sowie Streckung und eine gewisse Seitwärtsneigung erlauben, aber kaum eine Rotation. Eine straffe Gelenkkapsel, die am Rande der Gelenkfläche ansetzt, verbindet immer einen Proc. articularis superior mit dem Proc. articularis inferior des nächsthöheren Wirbels.

Das für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit entscheidende Element des lumbalen Bewegungssegmentes ist die Zwischenwirbelscheibe (Discus intervertebralis), die morphologisch jedoch nicht abgrenzbar ist. Obere und untere Begrenzung der Bandscheibe stellen hyalinknorplige Schlußplatten dar, die zugleich Wachstumsfugen des Wirbelkörpers sind und nicht mehr zur Bandscheibe gehören. In der Randzone des Faserringes, dem sogenannten Randleistenanulus, finden sich derbe, bindegewebige, nach SHARPEY benannte Fasern, die oben und unten in die knorpligen bzw. später knöchernen Randleisten der Wirbelkörper einstrahlen und dort verankert sind. Die Bandscheibe besteht daher lediglich aus Gallertkern (Nucleus pulposus) und Faserring (Anulus fibrosus).

Der Nucleus pulposus geht aus der Chorda dorsalis hervor. Neben den bläschenförmigen Chordazellen liegen im Gallertkern während der Wachstumszeit noch netzartige Stränge aus dicht zusammenstehenden Kernen vom Aussehen der Chordazellkerne (Chordareticulum). Die Maschenräume des Netzes enthalten eine flüssig-schleimige Grundsubstanz (JUNGHANNS 1968). So entsteht ein verzweigter Hohlraum, der zunächst mit synoviaähnlicher Flüssigkeit und später mit Gallertgewebe ausgefüllt ist.

Der verstärkte Faserring am Bandscheibenrand entwickelt sich in Gefolge zunehmender Biege- und Verschiebungsbeanspruchungen der Wirbelsäule. Die zunehmende Druckbelastung des gallertartigen Nucleus pulposus erfordert einen seitlichen Gegenhalt, d. h. eine Membran, die das Herauspressen der im Bandscheibenkern gelösten hochmolekularen Stoffe verhindert.

Der Anulus fibrosus erreicht seine endgültige Form und Struktur durch die faserbildenden Bindegewebszellen des Bandscheibenringes. HIRSCH und SCHAJOWICZ (1953) nehmen außerdem ein appositionelles Wachstum von seiten der langen Ligamente an, deren tiefe Lagen eine Fortsetzung des Wirbelkörperperiosts sind und auf den Zwischenwirbelscheiben ein membranartiges Perichondrium darstellen.

Die Faserringlamellen weisen in den einzelnen Bandscheibenabschnitten deutliche Unterschiede hinsichtlich Verlauf und Struktur auf. Ventral und seitlich ist der Anulus breiter, die Lamellen sind zahlreicher und dicker. Dorsal ist er schmal und hat nur wenige dünne Lamellen. Die Verbindung des Anulus mit dem vorderen Längsband ist wesentlich fester als die mit dem hinteren.

Von besonderer Bedeutung sind die Blutgefäßverhältnisse in den Bandscheiben. Während der embryonalen Entwicklung ziehen Blutgefäße vom paravertebralen Bindegewebe her in den äußeren Bandscheibenring hinein, erreichen aber nie die Innenzone und den Gallertkern. In der Außenzone des Faserringes neugeborener Kinder sind zahlreiche Blutgefäße zu finden, die zusammen mit lockerem, fibrillärem Bindegewebe von den Zwischenwirbellöchern aus eindringen und sich zwischen den Lamellen ausbreiten. Nach Untersuchungen von TONDURY (1955) und HASSLER (1969) bilden sich alle Bandscheibengefäße nach dem zweiten Lebensjahr wieder zurück, sodaß die Zwischenwirbelscheiben vierjähriger Kinder bereits völlig gefäßlos sind. Im Gegensatz zu den Wirbelkörperarterien und -venen, die durch das starre Gerüst der knöchernen Trabekel nicht dem axialen Belastungsdruck ausgesetzt sind, überträgt sich der hydrostatische

Druck in der Bandscheibe infolge des flüssigen Charakters der Grundsubstanz in vollem Umfang auf die Blutgefäßwand. Da beim sitzenden oder stehenden Kleinkind der Belastungsdruck in den Zwischenwirbelabschnitten größer ist als der intravasale Druck der Bandscheibengefäße, wird das Blut herausgedrückt. Es kommt zur Druckatrophie der Blutgefäße.

Erst wenn in höherem Alter die Bandscheibe ihren ursprünglichen Charakter verloren hat, das Gallertgewebe durch derbe Faserstrukturen ersetzt und das Bewegungssegment durch spondylophytische Spangen immobilisiert ist, können im Rahmen einer bindegewebigen Organisation wieder Blutgefäße in den Bandscheibenraum einsprossen. HASSLER (1969) fand bei stark degenerierten Bandscheiben regelmäßig Granulationsgewebe mit Gefäßen. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Bandscheibe auf die Stoffzufuhr aus den umgebenden Blutgefäßen angewiesen. Das Gefäßnetz des Knochenmarks reicht an zahlreichen Stellen bis an die knorpligen Abschlußplatten heran, und zwar dort, wo die Wirbelspongiosa in unmittelbarem Kontakt mit dem Knorpel steht. Gefäßgeflechte des Periosts und der Längsbänder in Nachbarschaft des Anulus fibrosus stellen weitere Zufuhrmöglichkeiten dar.

Im Innern der Bandscheibe gibt es keine Schmerzrezeptoren, sondern nur an deren Oberfläche. Sie beschränken sich auf den dorsalen Anteil des knorpligen Randleistenanulus und wurden bisher nur in der LWS nachgewiesen (COVENTRY 1969, WIBERG 1949, STILLWELL 1956, MULLIGAN 1957). Auch hier kann man sich vorstellen, daß ursprünglich zentral gelegene Nervenfasern durch Druckkräfte in den ersten Lebensjahren atrophieren und verschwinden. Bei Färbungsversuchen wurden vor allem im hinteren Längsband reichlich sensible Nervenendigungen nachgewiesen, die von großer klinischer Bedeutung sind (TSUKADA 1938, ROOFE 1940, EHRENHAFT 1943, WIBERG 1949 u. a.). HOVELAQUE 1925, ROOFE 1940 und WIBERG 1949 stellten distal vom Ganglion abgehende Nervenfasern fest, die durch das Foramen intervertebrale in den Spinalkanal zurückkehren, sich dort verzweigen und Verbindungen zu den Rezeptoren an der

Bandscheibenoberfläche haben. Bei der Diskussion um die Schmerzentstehung im Bewegungssegment ist zu berücksichtigen, daß die Kapseln der Wirbelgelenke viel mehr sensible Nervenendigungen enthalten als die Bandscheibe mit ihren Bändern.

2. Mechanik des Bewegungssegmentes

Die Wirbelsäule des Menschen wird sowohl durch statische als auch durch dynamische Kräfte beansprucht. Zur Aufrechterhaltung dieser Funktionen wechseln knöcherne und halbelastische bewegliche Elemente miteinander ab. Die Zwischenwirbelscheiben verbinden die Wirbelkörper und verleihen dem Bewegungssegment durch ihre Elastizität die erforderliche innere Verspannung. Die Elastizität der Bandscheibe hängt in erster Linie von ihrer Fähigkeit ab, Flüssigkeit aufzunehmen und wieder abzugeben. Druckabhängige Flüssigkeitsverschiebungen sind dabei von großer Bedeutung.

Je nach Stellung der Wirbelbogengelenke sind in den einzelnen Wirbelsäulenabschnitten Bewegungsausschläge in ganz bestimmten Richtungen möglich. Die intakte Bandscheibe nimmt als eine Art Halbgelenk an diesen Bewegungen teil und gestattet auf Grund ihrer begrenzten Kompressibilität und Dehnbarkeit den Wirbelbogengelenken einen gewissen Bewegungsspielraum. Intervertebrale Bewegungen werden von der Bandscheibe vollzogen und über die Wirbelbogengelenke dirigiert. Diese Gelenke sind mehr auf Gleiten als auf Druckbelastung eingestellt. Die Lendenwirbelsäule besitzt sagittal gestellte Gelenke, die Ausschnitte eines Zylindermantels darstellen und lediglich Beuge- und Streckbewegungen zulassen, Rotationen hingegen blockieren. Die anderen Komponenten des Bewegungssegmentes (Zwischenwirbelloch mit Nerven und Gefäßen, Bänder, Muskeln) sind den physiologischen Bewegungsausschlägen angepaßt. Die Einlagerung elastischen Bandscheibengewebes ergibt für Einzel- und

Dauerbelastung der Wirbelsäule in axialer Richtung eine ausgezeichnete Stoßdämpferfunktion. Der kompressible Gallertkern verhält sich physikalisch wie eine Flüssigkeitsblase und überträgt den axialen Druck gleichmäßig auf die knorpligen Deckplatten sowie auf den Anulus fibrosus, dessen Fasen dann auf Zug beansprucht werden. Bei einseitiger Belastung weicht der Gallertkern zum weniger belasteten Bandscheibenabschnitt aus, das heißt bei Vorbeugung nach hinten, nach Rückneigung nach vorn und bei Seitneigung zur gegenüberliegenden Seite.

HORTON (1958) fand bei Elastizitätsstudien von Bandscheibengewebe in polarisiertem Licht, daß der unter axialer Druckbelastung zur Seite ausweichende Nucleus pulposus elastisch von dem wie ein Tennisnetz wirkenden Fasersystem des Anulus fibrosus aufgefangen wird. Bei stärkerer Belastung flacht die Bandscheibe ab und wölbt sich seitlich vor; bei Entlastung richtet sie sich wieder auf. Nach Untersuchungen von HARTMANN (1970) mit Druck- und Stauchungsdiagrammen von Zwischenwirbelscheiben hält der Turgor des Nucleus pulposus die Fibrillen des Anulus fibrosus unter einer gewissen Ruhespannung. Er gibt den Fasern einen gewissen Verstreckungsgrad. Die Fasern haben einen elastischen Spielraum, in dessen Grenzen sie maximal beanspruchbar sind. Zugbelastungen fangen sie mit geringen Längenänderungen auf. Sinkt der Verstreckungsgrad bei erschlafften Bändern, so werden die Bewegungen bei Belastung weniger gedämpft und weniger gleichmäßig auf den Faserring übertragen. Bei Turgor- bzw. Volumenzunahme der Zwischenwirbelscheibe stehen die Anulus-fibrosus-Fasern unter verstärkter Spannung, der Verstreckungsgrad ist erhöht.

Gallertkern und Faserring stellen ein biomechanisches System dar, das bei normalem Turgor und Verstreckungsgrad der erheblichen Druckbelastung an der menschlichen Wirbelsäule gewachsen ist.

Über den Belastungsdruck der unteren Lendenbandscheiben liegen bereits mehrere rechnerische und experimentelle Untersuchungen vor (MORRIS und LUCAS 1951, BUSH, HORTON und SMARE 1966, MATTHIASH 1956, GROH 1968, NACHEMSON 1965, REISCHAUER 1949, MÜNCHINGER 1964, HERBERT 1953, WYSS und ULRICH 1954).
Nach den Berechnungen von MATTHIASH (1956) erreicht die Belastung der unteren Lendenbandscheiben durch Schwerkraft und Muskeltonus bei einem 184 cm großen, 93 kg schweren Mann ein Gewicht von 61 kg. Die von GROH (1968) errechneten Werte liegen etwas niedriger. Das Anheben 20 kg schwerer Gegenstände mit vorgehaltenen Armen und gebeugtem Rumpf läßt den Belastungsdruck auf über 1000 kg ansteigen (MÜNCHINGER 1964).

Intradiskale Druckmessungen an Bandscheibenpräparaten von Verstorbenen führten NACHEMSON (1956) sowie BUSH, HORTON und SMARE (1956) durch. MORRIS (1964) und NACHEMSON haben den Druck in der Bandscheibe am lebenden Menschen gemessen.

In entspannter Rückenlagerung lastet auf den unteren Lendenbandscheiben allein durch Muskel- und Bänderzug ein Druck von 15 kg. Schon die mit leichter Wirbelsäulenverkrümmung verbundene Seitlagerung bedeutet eine Belastungssteigerung auf den doppelten Wert. Der Druck erhöht sich im Stehen auf 100 kg, bei Vorneigung auf 140 kg und bei Vorneigung mit 20 kg Armbelastung auf 200 kg und mehr. In unangelehnter, sitzender Stellung ist die Bandscheibenbelastung mit 140 kg sogar größer als im Stehen. Vorneigung und Vorneigung mit Gewichten gehen mit weiteren Drucksteigerungen einher. Umgerechnet auf die Bandscheibenoberfläche ergeben sich Druckwerte von 10 bis 60 kg/cm^2. OKUSHIMA (1970) hat die Ergebnisse von NACHEMSON durch eigene intradiskale Druckmessungen (in vivo) bestätigt.

Nach den Messungen von SCHLÜTER (1965) sind im Bandscheibenzentrum die größten Hauptspannungsdifferenzen und damit die stärksten Schubspannungen anzunehmen. Angesichts dieser hohen Belastungen, die beim Menschen oft stundenlang wirksam sind, ist es nicht verwunderlich, daß die dem Druck ausgesetzten Bandscheibengefäße

und -nerven frühzeitig atrophieren und daß in einem so relativ schlecht ernährten (bradytrophen) Gewebe Degenerationserscheinungen auftreten. Die pathogenetische Bedeutung der großen Druckbelastung für die vorzeitige Bandscheibendegeneration beim Menschen wird von vielen Autoren betont (BRADFORD und SPURLING 1950, LINDBLOM 1950, LINDEMANN und KUHLENDAHL 1953, JUNGE 1957, MATTHIASH 1956, JUNGHANNS 1968 u.a.).

II. SPEZIELLER TEIL - EIGENE UNTERSUCHUNGEN:

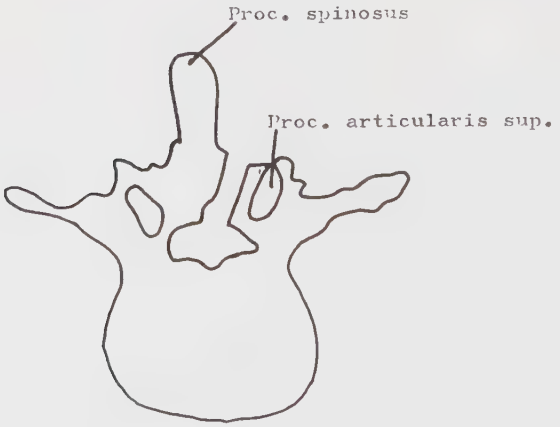
1. Anmerkungen zur Fragestellung der vorliegenden experimentellen Studie

Der Druckbelastung im Bereich vor allem der unteren Lendenwirbelsäule kommt eine erhebliche pathogenetische Bedeutung für eine vorzeitige Bandscheibendegeneration zu. Diese äußert sich nach IDELBERGER in einer zunehmenden Austrocknung der Bandscheibe, in deren Verlauf zunächst die Struktur des Anulus fibrosus deutlicher wird. Später kommt es dann zur Verwerfung der Lamellen des Anulus, dazu - vor allem in den Lendenbandscheiben - zur radiären Fissur; bei weit fortgeschrittener Zermürbung können sich sogar Teile des Anulus fibrosus herauslösen (Bandscheibensequester). Diese Spaltbildungen ermöglichen intradiskale Massenverschiebungen - solange die Sprengkraft des Nucleus pulposus erhalten ist -, wobei Teile des Schleimkerns und Faserringsequester in die Fissuren eindringen. Während Verlagerungen nach ventral klinisch stumm bleiben, führen dorsalwärts gerichtete Massenverschiebungen zu verstärkter Spannung des mit sensiblen Fühlern reichlich versehenen Längsbandes, bei Fissuren dorsolateral dazu evtl. noch zu Druck auf die Nervenwurzeln. Im ersten Falle kommt es zur akuten Lumbago, im zweiten Falle zur Ischialgie .

Bei der Ischialgie sind in 1 - 2% der Fälle operative Eingriffe erforderlich, und zwar bei

Cauda-Syndrom durch medialen Massenprolaps (Op-Indikation dringlich),
schweren Wurzelkompressionen mit neurologischen Ausfallserscheinungen,
Versagen aller konservativen Maßnahmen nach 4 - 6 Wochen.

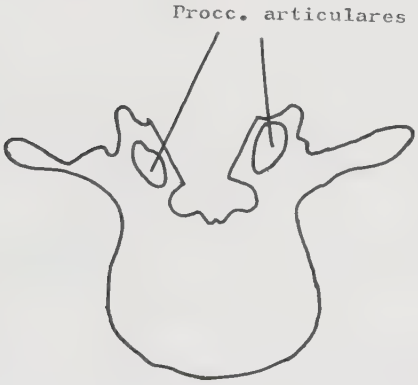
Zur Durchführung der operativen Therapie mit Entfernung des prolabierten Diskusanteils ist eine Eröffnung des knöchernen Spinalkanals erforderlich, da die in der Höhe zu den Wirbelkörpern versetzten Dornfortsätze einen 'konservativen' Zugang unmöglich machen. Der kleinste mögliche Eingriff dieser Art ist die sog. Hemilaminektomie, bei der (während einer Operation meist mit einer Knochenstanze) eine schmale Scheibe des Wirbelbogens zwischen Dornfortsatz und Wirbelgelenkfortsatz herausgetrennt wird.



Schematische Darstellung eines menschlichen Lendenwirbels nach Hemilaminektomie

Somit erhält man einen schmalen dorsolateralen Zugang, der bei nur kleinen prolabierten Diskusanteilen, die dazu noch günstig liegen, ausreichend sein kann.

Ist der Prozeß ausgedehnter, muß man einen Schritt weiter gehen und eine sogenannte Laminektomie vornehmen mit Herausnahme des gesamten Dornfortsatzes.



Schematische Darstellung eines menschlichen Lendenwirbels nach Laminektomie

Damit ist dann auch die Bandverbindung im Bereich der Dornfortsätze aufgehoben, da die Ligamenta supraspinalia und interspinalia dabei in ihrer Kontinuität unterbrochen werden, zum Teil auch das Ligamentum flavum. Dieser Eingriff ist zur Schaffung eines Zuganges im allgemeinen ausreichend. Man kann aber noch ein übriges tun und zusätzlich zur Laminektomie entweder eins oder sogar beide Gelenke exartikulieren und dementsprechend einen oder beide verbliebenen Wirbelbogenreste an der Bogenwurzel entfernen.

Schematische Darstellung eines menschlichen Lendenwirbels nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette

Schematische Darstellung eines menschlichen Lendenwirbels nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

Damit wäre dann die Kontinuität zweier benachbarter Wirbel im Bereich der Wirbelbögen ganz oder teilweise unterbrochen; im Falle der totalen Wirbelbogenentfernung ist die Kontinuität im Bereich der beiden betroffenen Wirbel nur noch durch die Bandscheibe sowie das vordere und das hintere Längsband gewahrt. Da eine Osteosynthese im Bereich der Wirbelbögen nicht durchgeführt wird, verbleibt die Wirbelsäule postoperativ in dem Zustand nach der entsprechenden Resektion.

Eine Eröffnung des knöchernen Spinalkanals kann erforderlich werden:

bei der erwähnten operativen Behandlung von Bandscheibenvorfällen,

in der Neurochirurgie zur Behandlung von Rückenmarks- und Caudatumoren, oder als entlastende Laminektomie bei intraspinalen Haematomen, oder

gelegentlich als orthopädischer Entlastungseingriff bei vertebra plana (Calvé).

Unter ungünstigen Umständen kann bei den beschriebenen Krankheiten auch einmal eine Laminektomie erforderlich werden, die mehrere benachbarte Wirbel erfaßt.

Da viele solcher Art operierter Patienten nach erfolgreicher Behandlung mindestens teilweise, wenn nicht sogar wieder voll arbeitsfähig werden, ihre Wirbelsäule also wieder voll belasten, drängt sich die Frage auf, wie die Wirbelsäule in rein mechanischer Hinsicht auf die teilweise oder vollständige Entfernung des Wirbelbogens unter physiologischen Belastungsformen sowie physiologischer Belastungsstärke reagiert. Die Fragestellung, zu deren Beantwortung die vorliegende experimentelle Studie einen Beitrag zu leisten versuchen will, lautet: Ist die Bandscheibe in der Lage, die durch teilweisen oder völligen Wegfall des Wirbelbogens zusätzlich

auftretenden Belastungen in rein mechanischer Hinsicht aufzunehmen?

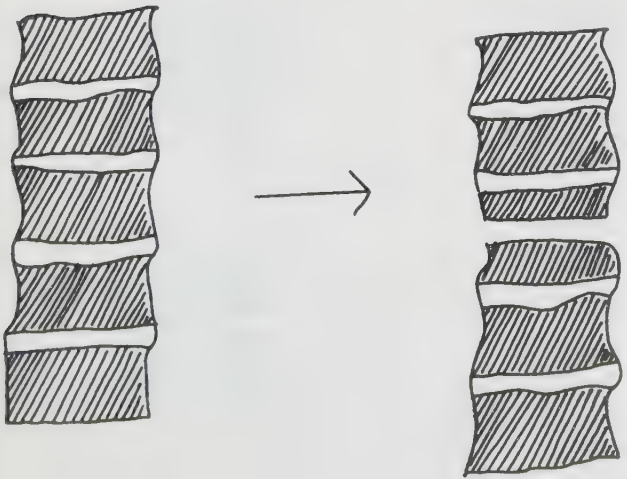
Mit den folgenden Experimenten soll versucht werden, einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage zu leisten.

2. Ausführung der Versuche

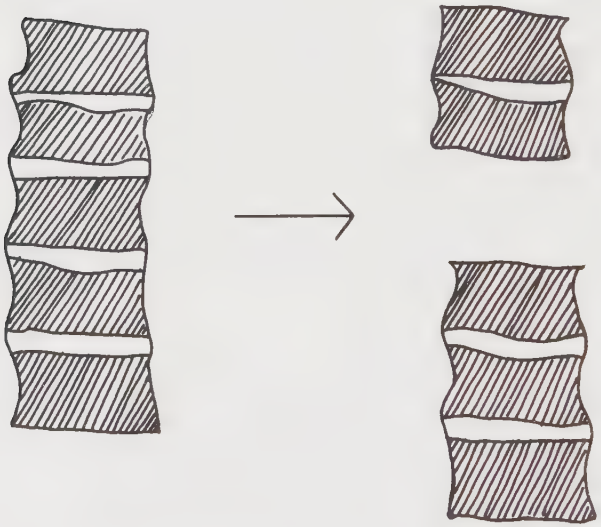
Bei der Durchführung der Experimente gelangten menschliche Lendenwirbelsäulen zur Anwendung, die im gerichtsmedizinischen Institut der Universität Düsseldorf aus den Leichen frischverstorbener Personen entnommen wurden. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, daß das Alter möglichst zwischen 15 und 60 Jahren lag; bis auf wenige Ausnahmen konnte diese Altersbegrenzung auch eingehalten werden. Nach der Entnahme mußten die meisten Präparate aus zeitlichen Gründen zumindest kurzfristig auf Eis aufbewahrt werden, bevor sie zur weiteren Verarbeitung gelangten. Diese Frist betrug im allgemeinen aber nur wenige bis zu 24 Stunden; wenn sie wesentlich überschritten wurde, so ist diese Tatsache in dem jeweiligen Versuchsprotokoll festgehalten.

Nach der Entnahme mußten die Präparate, um für die Versuche brauchbar zu sein, zunächst von den umgebenden Muskeln befreit werden. Zur Präparation dienten Skalpell, Pinzette, Schere und ein großer und ein kleiner scharfer Lüerscher Löffel. Aus den so hergestellten Knochenbandscheibenpräparaten wurden dann jeweils zwei kleinere Präparate hergestellt; dies erfolgte auf drei verschiedene Arten und Weisen:

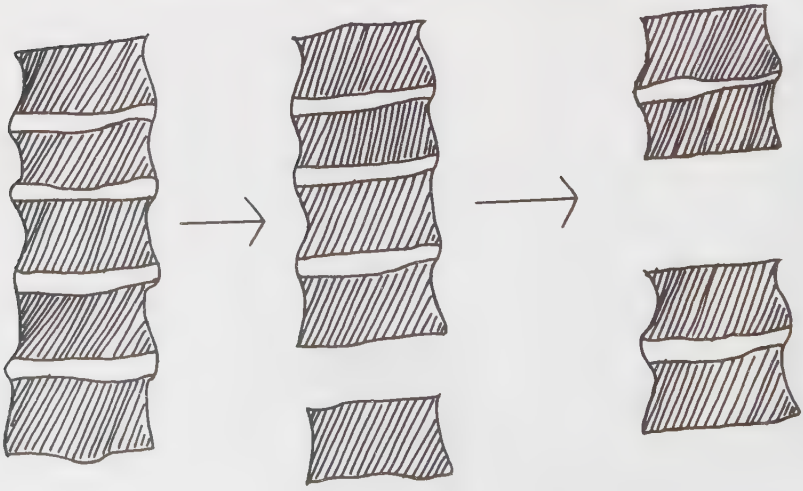
1. Zersägen der gesamten Wirbelsäule im Bereich des 3. Lendenwirbelkörpers - Resultat: zwei Präparate mit je 2 Bandscheiben.



2. Abtrennung der zwei unteren oder der zwei oberen Wirbelkörper im Bereich der 3. bzw. 2. Bandscheibe - Resultat: ein Präparat mit einer und ein Präparat mit zwei Bandscheiben.

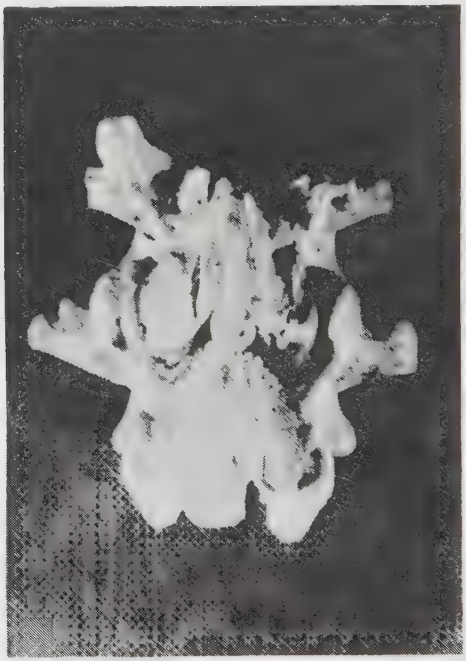


3. Abtrennung des 5. Lendenwirbelkörpers im Bereich der Bandscheibe L4 - L5, Trennung der verbliebenen Lendenwirbelsäule im Bereich der Bandscheibe L2 - L3 - Resultat: zwei Präparate mit je zwei Lendenwirbelkörpern und einer Bandscheibe.



Die proximalen und die distalen Enden der Präparate mußten dann noch so weit wie möglich von den hinterbliebenen Bandscheibenresten gereinigt werden, da die gallertartigen Nucleus pulposus-Reste das Einspannen in den Kompressionsdruckrahmen teilweise sehr erschwerten. Wenn erforderlich, wurde auch noch im Bereich der proximalen und der distalen Deckplatte ein Keil abgesägt, vor allem, wenn der Winkel, den die beiden Deckplatten bildeten, so groß war, daß ein Einspannen in den Kompressionsrahmen nicht möglich war.

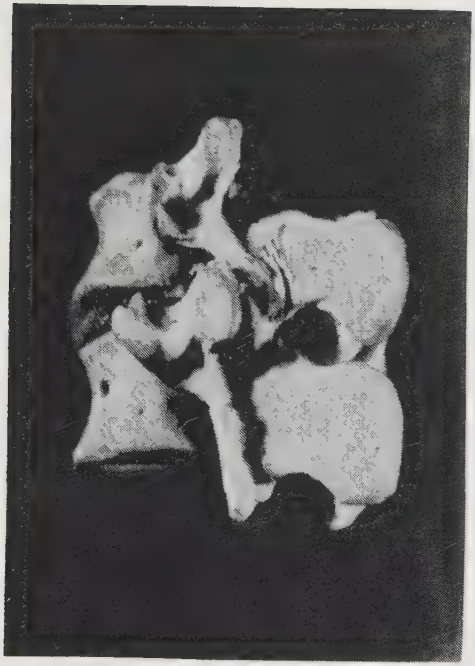
Nach dieser Vorbereitung der Präparate wurden dann, wenn irgend möglich, sofort die Röntgenleeraufnahmen angefertigt, d. h., das noch völlig unveränderte Präparat wurde in vier verschiedenen Projektionen geröntgt.



Lendenwirbelpräparat in posterior-anteriorer Projektion

Lendenwirbelpräparat in seitlicher Projektion

Lendenwirbelpräparat in Projektion schräg links



Lendenwirbelpräparat in Projektion schräg rechts

Aus technischen Gründen war ein sofortiges Röntgen der Präparate nur in seltenen Fällen möglich; deshalb mußten sie im allgemeinen kurzfristig in Wasser aufbewahrt werden. Da mit den Präparaten keine Quelldruckversuche durchgeführt werden sollten, erschien eine Aufbewahrung in Ringer- oder Tyrodelösung nicht erforderlich. Die Zeitspanne zwischen der Präparation und der Anfertigung der Röntgenleeraufnahmen schwankt im Bereich von 2 bis 12 Stunden.

und ist in den einzelnen Versuchsprotokollen festgehalten. Nach Anfertigung der Röntgenbilder in vier Ebenen wurden die Präparate nach Entfernung eines bestimmten Wirbelbogenanteils einer bestimmten Belastung ausgesetzt, wobei die im Bereich der Lendenwirbelsäule üblicherweise vorkommenden Bewegungsausschläge berücksichtigt wurden. Der Wirbelbogen wurde dann in folgenden Schritten abgetragen:

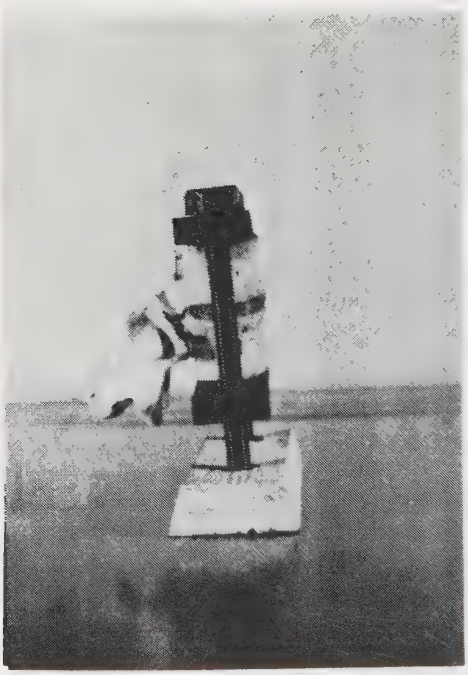
Hemilaminektomie

Laminektomie

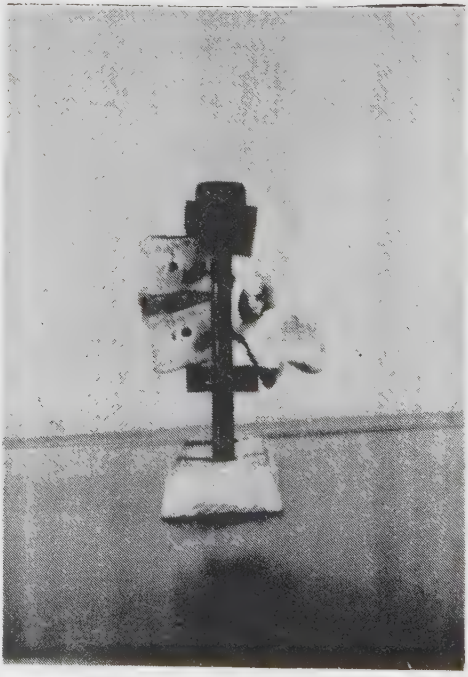
Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette

Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

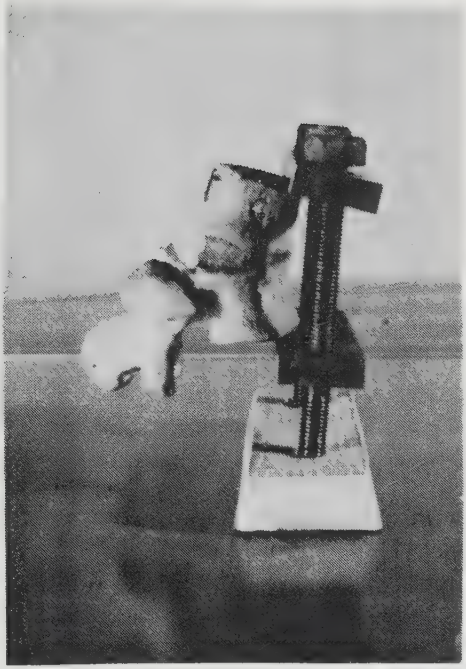
Nach der Demonstration der verschiedenen Schritte zur Abtragung des Wirbelbogens sollen nun am Beispiel des laminektomierten Präparates mit Entfernung beider Gelenkfacetten die Arten der Druckbelastung demonstriert werden.



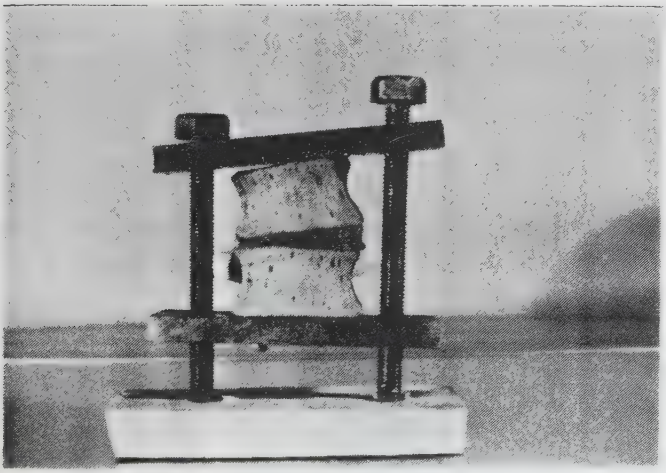
Symmetrische Kompression nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten



Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten



Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten



Asymmetrische Kompression - Seitkantenbelastung - nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

Das ganze Versuchsprogramm wurde also wie folgt durchgeführt:

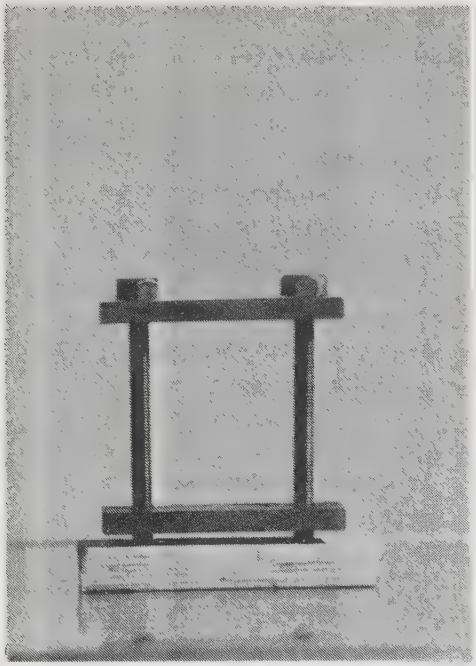
I. Symmetrische Kompression nach Hemilaminektomie (zwei Präparate), nach Laminektomie (zwei Präparate), nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette (zwei Präparate), nach Laminektomie und Entfernung zweier Gelenkfacetten (ein Präparat).

II. Asymmetrische Kompression - Lordose (Hinterkantenbelastung) nach Hemilaminektomie (zwei Präparate), nach Laminektomie (zwei Präparate), nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette (zwei Präparate), nach Laminektomie und Entfernung zweier Gelenkfacetten (zwei Präparate).

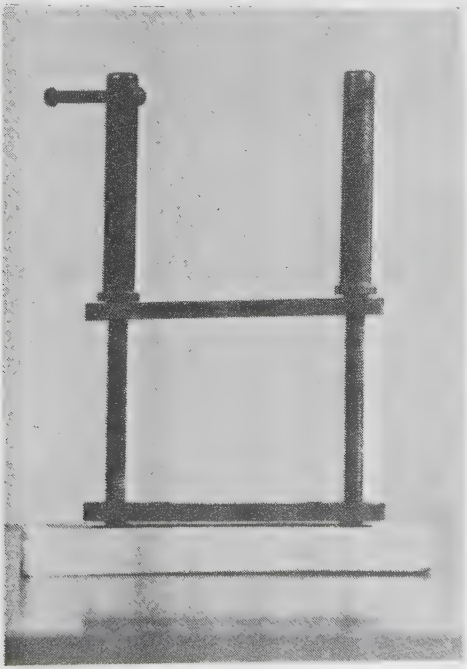
III. Asymmetrische Kompression - Kyphose - (Vorderkantenbelastung nach Hemilaminektomie (zwei Präparate), nach Laminektomie (zwei Präparate), nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette (zwei Präparate), nach Laminektomie und Entfernung zweier Gelenkfacetten (zwei Präparate).

IV. Asymmetrische Kompression - Seitkantenbelastung - nach Hemilaminektomie (ein Präparat), nach Laminektomie (ein Präparat), nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette (ein Präparat), nach Laminektomie und Entfernung zweier Gelenkfacetten (ein Präparat).

Die Ausführung der Versuche erfolgte mit Hilfe der von KRÄMER (1974) entwickelten Kompressionsdruckrahmen, von denen zwei verschiedene Typen zur Verfügung standen. Der erste (Typ 1) wurde mit Hilfe eines Drehmomentschlüssels gespannt, während der zweite (Typ 2) nach Gefühl mit der Hand gespannt werden mußte. Die Meßwerte haben jedoch gezeigt, daß die erzielten Druckwerte nicht wesentlich voneinander abwichen.



Kompressionsrahmen
Typ 1



Kompressionsrahmen
Typ 2

Zur Versuchsausführung muß erwähnt werden, daß einige Präparate unphysiologisch hohen Druckbelastungen ausgesetzt wurden. Weiterhin war bei der Durchführung der asymmetrischen Kompression zur Simulation einer Lordose die Einlagerung von schmalen Holzleisten zwischen Kompressionsrahmen und Präparat erforderlich, um den Kompressionsdruck ganz auf den dorsalen Anteil des Wirbelkörpers zu konzentrieren. Zur Ausführung der asymmetrischen Kompression zur Simulation einer Kyphose ist anzumerken, daß die Präparate auf Grund der geringen Druckfläche sehr leicht aus den Kompressionsrahmen herausrutschten; deshalb wurde, wie in den entsprechenden Versuchsprotokollen angedeutet, zwischen Präparat und Metall oben und unten ein Stück grobkörniges Schleifpapier eingelegt. Bei der asymmetrischen Kompression zur Simulation einer Seitkantenbelastung wurde (siehe Versuchsprotokolle) ein schmales Stückchen Holz zwischen den Kompressionsrahmen und die belastete Seitkante gelegt, um eine maximale Konzentration des Kompressionsdruckes auf der betreffenden Seitkante zu erreichen.

Nach Beendigung der Versuche wurden die Präparate aus den Kompressionsrahmen herausgenommen und erneut in der bereits beschriebenen Weise in vier Projektionen geröntgt. Die Auswertung der Versuche basiert somit

1. auf den Leeraufnahmen, die von jedem Präparat angefertigt wurden

   und

2. auf den in gleicher Projektion angefertigten Röntgenaufnahmen nach Abschluß der Versuche.

3. Versuchsauswertung

Zur Versuchsauswertung wurden die vor und nach Abschluß der Versuche angefertigten Röntgenaufnahmen herangezogen. Die Auswertung begann bei den Leeraufnahmen mit der Ausmessung des Zwischenwirbelraumes in der Projektion p.a.; gemessen wurde die Weite des Zwischenwirbelraumes an der linken und rechten Kante und in der Mitte. Handelte es sich um ein Präparat mit zwei Zwischenwirbelräumen, erfolgte die Ausmessung links oben und unten, rechts oben und unten sowie in der Mitte oben und unten. Als nächstes wurde das Präparat in seitlicher Projektion vermessen, und zwar vorn, hinten und in der Mitte des Zwischenwirbelraumes; bei Doppelpräparaten wurde bei beiden Zwischenwirbelräumen entsprechend verfahren. In gleicher Weise wie bei den Seitaufnahmen erfolgte die Vermessung der Schrägaufnahmen in beiden Projektionen; hier wurde die dem Dornfortsatz abgewandte Seite als vorn und die ihm zugewandte Seite als hinten bezeichnet.

Der Ausmessung der Präparate schloß sich eine allgemeine Beurteilung jeweils aller vier Röntgenaufnahmen gemeinsam an. Folgenden Kriterien wurde besondere Aufmerksamkeit gewidmet: bestehenden osteoporotischen Veränderungen, Diskushernien, Randzackenbildungen, Frakturen, Verschiebungen, Achsabweichungen in irgendeiner Richtung bestehenden Einengungen der Foramina intervertebralia sowie Form und Weite der Wirbelgelenkspalten.

Nach Abschluß der Versuche wurden die Präparate nochmals in gleicher Weise vermessen. Damit konnten Art und Auswirkung der ausgeübten Kompression objektiviert werden. In der röntgenologischen Beurteilung richtete sich das Augenmerk wiederum hauptsächlich auf: Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen, Einengungen der Foramina intervertebralia und Veränderungen an den kleinen Wirbelgelenken.

Um versuchsbedingte Veränderungen erkennen zu können, wurden die Versuchsaufnahmen im direkten Vergleich mit den in gleicher Projektion angefertigten Leeraufnahmen ausgemessen und beurteilt.

4. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Serie I, Versuch Nr. 1

Symmetrische Kompression nach Hemilaminektomie

Präparat Nr. 1, Daten: Alter 25 Jahre, Geschlecht männlich, Todesursache Unfall ohne Wirbelsäulenbeteiligung

Befund Leeraufnahmen: Kein Anhalt für Randkantenausziehungen, Osteoporose, bestehende Diskushernien, Verschiebungen nach ventral, dorsal oder seitlich, grobe Deformierungen. Schmales, schlankes Präparat, unauffällige Knochenstruktur. Foramina intervertebralia und kleine Wirbelgelenke unauffällig.

Befund Versuchsaufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen der Wirbelkörper gegeneinander. Foramina intervertebralia sind unauffällig. Keine Gelenkspalterweiterung der kleinen Wirbelgelenke.

Beurteilung: Deutlicher Kompressionseffekt ohne pathologische Befundänderung.

Serie I, Versuch Nr. 2:

Symmetrische Kompression nach Hemilaminektomie

Daten siehe Versuch Nr. 1.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Randzacken, Frakturen, Diskushernien. Foramina intervertebralia, kleine Wirbelgelenke, Gelenkspalten, Knochenstruktur unauffällig. Keine Verschiebungen. Schmales, schlankes Präparat.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Diskushernien. Auf der Seitaufnahme leichte Impression der oberen Deckplatte, jedoch kein eindeutiger Frakturhinweis. Keine Verschiebungen. Foramina intervertebralia frei. Kleine Wirbelgelenke unauffällig.
Beurteilung:	Gegenüber den Leeraufnahmen keine pathologischen Veränderungen.

Serie I, Versuch Nr. 3:

Symmetrische Kompression mit Laminektomie

Daten: 41 Jahre, Geschlecht: männlich, Todesursache: Suicid.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Randzackenbildungen, Osteoporose, Achsabweichungen. Kleine Wirbelgelenke, Gelenkspalte, Knochenstruktur o.B., keine Verschiebungen oder Deformitäten.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Achsabweichungen, Verschiebungen, Diskushernien, Gelenkspalterweiterungen der kleinen Wirbelgelenke. Foramina intervertebralia unauffällig.
Beurteilung:	Bei deutlichem Kompressionseffekt keine pathologischen Veränderungen gegenüber den Leeraufnahmen.

Serie I, Versuch Nr. 4:

Symmetrische Kompression nach Laminektomie

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 3.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Randkantenausziehungen, Frakturen, Diskushernien, Achsabweichungen. Die Foramina intervertebralia sowie die kleinen Wirbelgelenke und Gelenkspalten sind unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Zum Einapannen mußte das sehr große und kräftige Präparat oben und unten abgesägt werden, da ansonsten der Rahmen zu klein gewesen wäre. Kein Anhalt für Frakturen, lediglich durch den Rahmen verursachte Impressionen, oben deutlich, unten angedeutet. Keine Diskushernien. Im unteren Foramen intervertebrale verstärkte Diskusvorwölbung, die aber schon auf der Leeraufnahme sehr ausgeprägt war und sich unter Kompression noch verstärkt hat. Im kaudalen Segment angedeutete Dorsalverschiebung (Folge des keilförmigen Absägens zur besseren Komprimierbarkeit?). Kleine Wirbelgelenke und Gelenkspalten unauffällig.
Beurteilung:	Leicht pathologische Veränderungen im Diskusbereich, Verschiebungen wahrscheinlich artefiziell.

Serie I, Versuch Nr. 5:

Symmetrische Kompression nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette.

Daten des Präparates: Geschlecht männlich, Alter 37 Jahre, Todesursache Herzversagen

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, bestehende Frakturen, Achsabweichungen, Diskushernien. Kräftiger Knochenbau. Foramina intervertebralia unauffällig, ebenso die kleinen Wirbelgelenke bis auf weite Gelenkspalten.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia unverändert, ebenso die kleinen Wirbelgelenke.
Beurteilung:	Keinerlei pathologische Abweichungen gegenüber den Leeraufnahmen.

Serie I, Versuch Nr. 6:

Symmetrische Kompression nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 5.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Verschiebungen, Osteoporose, Randzackenbildungen. Foramina intervertebralia frei. Keine Diskushernien. Im kleinen Wirbelgelenk konischer Gelenkspalt, in Projektion schräg links besser zu sehen als in Projektion schräg rechts, sonst unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Verschiebungen, Diskushernien. Foramina intervertebralia frei. Im erwähnten konischen Gelenkspalt scheinen die Gelenkflächen jetzt parallel zueinander zu stehen (Projektion?).
Beurteilung:	Gegenüber den Leeraufnahmen keine pathologischen Veränderungen.

Serie I, Versuch Nr. 7:

Symmetrische Kompression nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

Daten des Präparates: Geschlecht weiblich, Alter 29 Jahre, Todesursache Suicid

Befund Leeraufnahmen: Kein Anhalt für Osteoporose, Verschiebungen, Frakturen, Randzackenbildungen, Diskushernien. Kleine Wirbelgelenke, Gelenkspalten und Foramina intervertebralia unauffällig.

Befund Versuchsaufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Verschiebungen, Impressionen, Diskushernien. Foramina intervertebralia sowie kleine Wirbelgelenke unverändert. Leicht angedeutete Dorsalverlagerung im distalen Bewegungssegment.(Durch Absägen geänderte Richtung des Kompressionsdruckes ?).

Beurteilung: Gegenüber den Leeraufnahmen keine wesentlichen pathologischen Veränderungen.

Serie II, Versuch Nr. 1:

Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Hemilaminektomie.

Präparat: Alter 30 Jahre, Geschlecht männlich,
Todesursache nicht bekannt.

Befund Leeraunahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Osteoporose, Randzackenbildungen, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia, Gelenkspalten und kleine Wirbelgelenke unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Achsabweichungen, Verschiebungen, leichte Impression am distalen Wirbelkörper durch Kompressionsrahmen. Gewünschter Kompressionseffekt gut sichtbar. Auf der Seitaufnahme leichte konische - nach oben offene - Verformung des Gelenkspaltes, auf den Schrägaufnahmen jedoch nicht bestätigt.
Beurteilung:	Gegenüber den Leeraufnahmen keine wesentlichen pathologischen Veränderungen.

Serie II, Versuch Nr. 2:

Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Hemilaminektomie.

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 1.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Osteoporose, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia und Gelenke unauffällig. Gelenkspalt scheint auf Seitaufnahmen leicht nach oben offen zu sein, sonst o.B.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Gelenkspalten im Vergleich zu den Leeraufnahmen nicht auffällig verändert, Foramina intervertebralia und kleine Gelenke unauffällig.
Beurteilung:	Gegenüber den Leeraufnahmen keine pathologischen Veränderungen.

Serie II, Versuch Nr. 3:

Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Laminektomie

Daten des Präparates: Alter 63 Jahre, Geschlecht weiblich,
Todesursache Herztod

Befund Leeraufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Osteoporose, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Deutliche Randkantenausziehungen, weite Gelenkspalten, Foramina intervertebralia frei.

Befund Versuchsaufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Verschiebungen, Diskushernien, Achsabweichungen. Gelenkspalten und Foramina intervertebralia unverändert.

Beurteilung: Keine pathologischen Veränderungen durch die Kompression.

Serie II, Versuch Nr. 4:

Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Laminektomie

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 3.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Achsabweichungen, Verschiebungen. Deutliche Randkantenausziehungen, Auflockerung der Knochenstruktur im ventralen Anteil der Wirbelkörper, Foramina intervertebralia frei, Gelenke unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Verschiebungen, Achsabweichungen, Diskushernien. Foramina intervertebralia und Wirbelgelenke frei. Gelenkspalten frei, Winkel der Gelenkspalten zueinander scheint leicht verändert. Angedeutete Impression des Rahmens im Bereich der distalen Deckplatte dorsal.
Beurteilung:	Kein pathologischen Veränderungen gegenüber den Leeraufnahmen.

Serie II, Versuch Nr. 5:

Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette

Präparat: Alter 41 Jahre, Geschlecht männlich, Unfalltod

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Diskushernien, Achsabweichungen, Verschiebungen. Foramina intervertebralia, kleine Wirbelgelenke, Gelenkspalten unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Leichte Diskusvorwölbung im Foramen intervertebrale, Gelenkspalten und kleine Wirbelgelenke unverändert.
Beurteilung:	Keine pathologischen Abweichungen von den Leeraufnahmen bei deutlichem Kompressionseffekt.

Serie II, Versuch Nr. 6:

Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 5.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Diskushernien, Achsabweichungen, Randkantenausziehungen. Gelenke und Gelenkspalten unauffällig. Leichte Ventralverschiebung im distalen Segment (2. WK nach ventral verlagert; unteres Foramen intervertebrale daher leicht eingeengt), sonst unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Verschiebungen, Diskushernien; Impressionen an der Stelle der Krafteinwirkung oben und unten. Leichte Diskusvorwölbung oben und unten, leichte Einengung der Foramina intervertebralia; beschriebene Verschiebung im distalen Segment unverändert. Gelenkspalten etwas flacher gestellt, aber nicht erweitert.
Beurteilung:	Keine wesentlichen pathologischen Veränderungen gegenüber den Leeraufnahmen.

Serie II, Versuch Nr. 7:

Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

Präparat: Geschlecht männlich, Alter 57 Jahre, Herztod

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Diskushernien, Randkantenausziehungen, Verschiebungen, Achsabweichungen; Foramina intervertebralia, Gelenke und Gelenkflächen unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Impressionen, Verschiebungen, Achsabweichungen, Diskushernien; kleine Gelenke und Gelenkspalten unauffällig, Foramina intervertebralia ganz leicht eingeengt.
Beurteilung:	Keine pathologischen Veränderungen gegenüber den Leeraufnahmen.

Serie II, Versuch Nr. 8:

Asymmetrische Kompression - Lordose - nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 7.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Randkantenausziehungen, Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen; Foramina intervertebralia, kleine Gelenke und Gelenkspalten unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Achsabweichungen, Verschiebungen, Deformierungen der Gelenke und Gelenkspalten. Leichte Impression der unteren Deckplatte dorsal gelegen. Diskus angedeutet stärker vorgewölbt. Sonstiger Befund unauffällig.
Beurteilung:	Gegenüber den Leeraufnahmen keine wesentlichen pathologischen Veränderungen.

Serie III, Versuch Nr. 1:

Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Hemilaminektomie

Daten des Präparates: Alter 67 Jahre, Geschlecht weiblich, Todesursache nicht bekannt.

Befund Leeraufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Kräftiger Knochenbau. Schmaler Zwischenwirbelraum, Foramina intervertebralia, kleine Wirbelgelenke und Gelenkspalten unauffällig

Befund Versuchsaufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Mäßiger Kompressionseffekt. Kleine Wirbelgelenke, Gelenkspalten und Foramina intervertebralia unauffällig. Leichte Impression des oberen Wirbelkörpers durch den Kompressionsrahmen.

Beurteilung: Keine pathologischen Abweichungen von den Leeraufnahmen.

Serie III, Versuch Nr. 2:

Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Hemilaminektomie

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 1

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia, kleine Wirbelgelenke und Gelenkspalten unauffällig. Deutliche Randkantenauszichungen.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia, kleine Gelenke und Gelenkspalten unverändert. Zur besseren Einspannbarkeit mußte das Präparat oben abgesägt werden.
Beurteilung:	Gegenüber den Leeraufnahmen keine pathologischen Veränderungen.

Serie III, Versuch Nr. 3:

Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Laminektomie

Daten des Präparates: Geschlecht weiblich, Alter 31 Jahre, natürlicher Tod.

Befund Leeraufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Osteoporose, Verschiebungen, Achsabweichungen; leichte Randkantenausziehungen an der dorsalen Seite der Deckplatten (siehe Seitaufnahme). Foramina intervertebralia, kleine Gelenke und Gelenkspalten unauffällig.

Befund Versuchsaufnahmen: Kein Anhalt für Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen; leichte Impressionen im ventralen Anteil der Deckplatte oben und unten; obere Deckplatte ventral angedeutet eingeknickt, dadurch ventral erniedrigter Wirbelkörper (27/25 mm). Leichte Diskusvorwölbung nach vorn und hinten. Foramina intervertebralia, kleine Gelenke und Gelenkspalten frei, scheinen etwas schmaler als auf den Leeraufnahmen. Der untere Wirbelkörper ist ebenfalls ventral erniedrigt (26/24 mm).

Beurteilung: Leichte pathologische Veränderungen (Impressiosfrakturen der Wirbelkörper) ohne Verschiebungen.

Serie III, Versuch Nr. 4:

Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Laminektomie

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 3.

Befund Leeraufnahmen:	Keine Osteoporose, Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen; kleine Wirbelgelenke und Foramina intervertebralia frei, große weite Gelenkspalten, unten weiter als oben; das obere Gelenk steht etwas steiler als das untere. Sonstiger Befund unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien; auf schräg links angedeutete Verschiebung sonst nicht nachweisbar (Projektion?). Leichte Ausweitung der Diskusvorwölbung nach vorn und hinten im unteren Segment. Foramina intervertebralia frei, Gelenkspalten enger als auf Leeraufnahmen. Gelenkflächen jetzt exakt parallel. Die auf schräg links angedeutete Verschiebung ist auch auf der Leeraufnahme zu sehen und hat nicht zugenommen.
Beurteilung:	Keine wesentlichen pathologischen Veränderungen gegenüber den Leeraufnahmen.

Serie III, Versuch Nr. 5:

Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette.

Daten des Präparates: Alter 22Jahre, Geschlecht weiblich, Todesursache unbekannt.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Osteoporose, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen; Foramina intervertebralia, kleine Gelenke und Gelenkspalten unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen; Foramina intervertebralia und kleine Gelenke unauffällig.
Beurteilung:	Keinerlei pathologische Abweichungen gegenüber den Leeraufnahmen.

Serie III, Versuch Nr. 6:

Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 5.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Diskushernien. Verschiebungen, Achsabweichungen: leichte Ventralverlagerung des unteren Wirbelkörpers. Foramina intervertebralia und kleine Gelenke unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen; oberer Wirbelkörper (36/30 mm) und unterer Wirbelkörper (35/29 mm) ventral deutlich erniedrigt, doch kein eindeutiger Frakturhinweis. Foramina intervertebralia und kleine Gelenke unauffällig. Seitaufnahme: Angedeutete Gefügelockerung im Übergang unterer/oberer Wirbelbogen (fehlende Gelenkfacette?).
Beurteilung:	Ventrale Impressionsfraktur? Sonst normale Verhältnisse.

Serie III, Versuch Nr. 7:

Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

Daten des Präparates: Alter 24 Jahre, Todesursache unbekannt.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Osteoporose, Verschiebungen, Achsabweichungen, Diskushernien. Gelenkspalt unten enger als oben (konisch). Foramina intervertebralia und Gelenke ansonsten frei.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Verschiebungen, Achsabweichungen, Diskushernien; Impressionsfraktur des oberen LWK ventral, Erniedrigung (36/30 mm). Sonstiger Befund unauffällig.
Beurteilung:	Impressionsfraktur des oberen LWK ventral, sonst keine Abweichungen von den Leeraufnahmen.

Serie III, Versuch Nr. 8:

Asymmetrische Kompression - Kyphose - nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 7.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Diskushernien, Achsabweichungen. Verschiebungen: proximaler Wirbelkörper ca. 2 - 3 mm nach links verlagert und ca. 2 mm nach dorsal verschoben. Foramina intervertebralia und kleine Gelenke sind unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Diskushernien, Achsabweichungen. Die beschriebenen Verschiebungen haben nicht zugenommen, in seitlicher Projektion Impression des Wirbelkörpers ventral mit Erniedrigung (35/29 mm). Schräg rechts: Stauchungsfraktur des oberen LWK mit Absprengung eines dreieckigen Fragmentes, Bruchspalt zum Diskus hin weiter als zur Deckplatte. Schräg links: Kontur der oberen Deckplatte unterbrochen, ventral Erniedrigung des Wirbelkörpers.
Beurteilung:	Ausgeprägte Impressionsfraktur des proximalen LWK ventral, sonst keine pathologischen Veränderungen gegenüber den Voraufnahmen.

Serie IV, Versuch Nr. 1:

Asymmetrische Kompression - Seitkantenbelastung - nach Hemilaminektomie

Daten des Präparates: Alter 17 Jahre, Geschlecht weiblich, Todesursache Ertrinken.

Befund Leeraufnahmen: Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Kleine Wirbelgelenke, Foramina intervertebralia und Gelenkspalten unauffällig.

Befund Versuchsaufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Gelenkspalten im Vergleich zu den Leeraufnahmen in Projektion schräg links oben etwas verengt, in Projektion schräg rechts unten etwas erweitert.

Beurteilung: Keine wesentlichen pathologischen Veränderungen im Vergleich zu den Leeraufnahmen.

Serie IV, Versuch Nr. 2:

Asymmetrische Kompression - Seitkantenbelastung - nach Laminektomie

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 1.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia, Gelenkspalten und kleine Gelenke unauffällig.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Gelenkspalten: in Projektion schräg links nach oben leicht erweitert, in Projektion schräg rechts verengt. Foramina intervertebralia unauffällig.
Beurteilung:	Leichte Formveränderungen an den Gelenkspalten. Ansonsten gegenüber den Leeraufnahmen unauffällig.

Serie IV, Versuch Nr. 3:

Asymmetrische Kompression- Seitkantenbelastung - nach Laminektomie und Entfernung einer Gelenkfacette

Daten des Präparates: Alter 31 Jahre, Geschlecht männlich, Todesursache Suicid

Befund Leeraufnahmen: Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia frei. Gelenkspalten: in Projaktion schräg rechts etwas weiter als in Projektion schräg links und etwas bogig geformt, ansonsten unauffällig.

Befund Versuchsaufnahmen: Kein Anhalt für Frakturen, Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia frei. Gelenkspalten: Spalt in Projektion p.a. unten leicht verengt, oben unverändert. Spalten auf Schrägaufnahmen völlig unverändert.

Beurteilung: Gegenüber den Leeraufnahmen keine pathologischen Veränderungen.

Serie IV, Versuch Nr. 4:

Asymmetrische Kompression - Seitkantenbelastung - nach Laminektomie und Entfernung beider Gelenkfacetten

Daten des Präparates siehe Versuch Nr. 3.

Befund Leeraufnahmen:	Kein Anhalt für Osteoporose, Frakturen, Achsabweichungen, Verschiebungen, Diskushernien. Foramina intervertebralia frei. Gelenkspalten in Projektion schräg links etwas weiter als in Projektion schräg rechts.
Befund Versuchsaufnahmen:	Kein Anhalt für Diskushernien, Verschiebungen, Achsabweichungen. Foramina intervertebralia frei. In Projektion schräg rechts und seitlich deutliche Erniedrigung der proximalen Deckplatte mit Ausbildung einer Frakturrandzacke. Erniedrigung ist auch in Projektion p.a. zu sehen.
Beurteilung:	Deutliche Impressionsfraktur der proximalen Deckplatte, sonstiger Befund nicht verändert.

5. Diskussion

Die Versuche haben gezeigt, daß die Bandscheibe in der Lage ist, die Stabilität des lumbalen Bewegungssegmentes auch bei völligem Fehlen der Wirbelgelenke und unphysiologischer Belastung aufrechtzuerhalten. In keinem Falle wurden Diskushernien beobachtet, die kleinen Wirbelgelenke waren bis auf leichte Gelenkspalterweiterungen oder -verengungen unauffällig, und Verschiebungen fanden sich nur in den beiden erwähnten Fällen, wo die Veränderungen vermutlich artefizieller Art sind. Demgegenüber kam es bei den durchgeführten In-Vitro-Versuchen häufiger zu Frakturen, die zum einen als Folge unphysiologischer Kompressionsbelastung und zum anderen als Folge der angewandten Versuchsmethode angesehen werden müssen (Ausübung des Kompressionsdruckes auf den relativ nachgiebigen Knochen mit Hilfe völlig unnachgiebiger Metallkompressionsrahmen). Man kann also sagen, daß, bevor es zu Verschiebungen oder sogar zum Abrutschen der Wirbelkörper voneinander kommt, Frakturen zu erwarten sind. Wirbelbrüche der beobachteten Art werden beim lebenden Menschen unter statischer Dauerbelastung kaum vorkommen, da hier der unnachgiebige Kompressionsrahmen durch relativ nachgiebige Strukturen (Bandscheibe und Wirbelkörper) ersetzt ist. Hier kommen Wirbelbrüche entweder durch schwere Traumen zustande, oder sie finden sich bei pathologischen Veränderungen am Knochen selbst (hochgradige Osteoporose, Karzinommetastasen, Plasmozytom). Jedoch finden sich Wirbelbrüche ebenso an nichtoperierten Wirbelsäulen, so daß bei einer Wirbelbogenabtragung mit keiner erhöhten Frakturfrequenz zu rechnen ist. Die Frage, ob die Wirbelsäule unter Kompressionsbelastung und teilweiser oder völliger Abtragung des Wirbelbogens ihre Stabilität in mechanischer Hinsicht beibehält, kann auf Grund der vorliegenden Versuchsergebnisse bejaht werden. Bei der Wertung der vorliegenden Arbeit ist jedoch zu berücksichtigen, daß eine Aussage über degenerative Spätveränderungen nicht möglich ist. Hierzu müßten unter anderem Messungen des intradiskalen Drucks vorgenommen werden, der ja, wie schon oben erwähnt, für die vorzeitige Alterung des Bandscheibengewebes verantwortlich ist.

Eine klinische Untersuchung von Spätschäden nach Laminektomien wurde bereits im Jahre 1977 von FRANK in Tübingen durchgeführt. Dabei wurden Patienten nachuntersucht, bei denen Laminektomien unterschiedlichen Ausmaßes in allen Bereichen der Wirbelsäule vorgenommen worden waren. Dabei ergaben sich für den Bereich der LWS in einigen Fällen Muskelatrophien, Sensibilitätsverluste und Verluste der Schmerzempfindung sowie Parästhesien. Weiterhin gaben alle Patienten Kreuzschmerzen und ischialgiforme Beschwerden an, die sich jedoch nur in einem Falle verschlechtert hatten. Die übrigen neuromuskulären Symptome zeigten postoperativ keine zunehmende Tendenz. Eine Untersuchung auf sichtbare Fehlstellungen und Bewegungseinschränkungen ergab lediglich in einem Falle eine Hyperlordose. Bei den Skoliosewinkeln ergaben sich keine gravierenden Abweichungen. In zwei Fällen waren einerseits ein Höhenverlust, andererseits eine Höhenzunahme der Zwischenwirbelräume festzustellen.

Insgesamt zog FRANK die Schlußfolgerung, daß die LWS in Bezug auf Veränderungen der Skoliose- und Lordosewinkel und andere morphologische Abweichungen von allen Wirbelsäulenabschnitten am wenigsten anfällig zu sein scheint. In der übrigen Literatur finden sich jedoch auch Angaben über Fehlstellungen der LWS nach Laminektomien. So beobachtete GÜNTZ eine zunehmende Kyphosierung der LWS vor allem nach Laminektomien im Kindes- und Jugendalter, welche er auf den Wegfall der Haltefunktionen der Ligg. flava zurückführt. RAUE hingegen beobachtete eine Zunahme der Lordosierung der LWS nach Laminektomien bei 119 übergewichtigen Patienten. Skoliosen waren nach übereinstimmender Meinung aller Autoren nur selten zu beobachten. JACKSON (1971) stellte bei einem hohen Prozentsatz seiner Patienten Rückenschmerzen fest, die umso häufiger auftraten und ausgeprägter waren, je älter die Patienten zum Zeitpunkt der Operation waren, bzw. je ausgeprägter die degenerativen Vorschädigungen waren. Die neuromuskuläre Symptomatik des Patientengutes von FRANK hatte sich nicht verschlechtert. Nach seiner Ansicht zeigte sich die LWS gegenüber den durchgeführten Eingriffen bemerkenswert stabil. Es muß allerdings hinzugefügt werden, daß

sich alle Patienten noch im Alter bis zu 47 Jahren befanden, also wahrscheinlich über eine weitgehend unverbrauchte Wirbelsäule und intakte Bandscheiben verfügten.

MAYLOR (1974) ist der Ansicht, daß eine Laminektomie nur wenig Einfluß auf die Stabilität der LWS habe. Bei Vorhandensein von degenerativen Bandscheibenschäden und mechanischen Instabilitäten könne eine Laminektomie genügen, um die Instabilität zu vergrößern und zu weiteren Symptomen zu führen.

Insgesamt zeigte die Untersuchung von FRANK, daß die Stabilität der LWS zumindest nach Laminektomien gewahrt bleibt. Die beobachteten Veränderungen waren im Gegensatz zu denen der anderen Wirbelsäulenabschnitte in keinem Falle gravierender Art.

Zusammenfassend läßt sich die Aussage machen, daß sowohl klinisch als auch experimentell der Nachweis der mechanischen Stabilität der Lendenwirbelsäule nach Laminektomie erbracht ist. Voraussetzung ist allerdings, daß die Wirbelsäule und insbesondere die Bandscheibe völlig intakt sind bzw. keine degenerativen Vorschädigungen aufweisen, die über das altersentsprechend physiologische Maß hinausgehen. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, dürften auch keine gravierenden neurologischen Funktionseinschränkungen zu erwarten sein.

Nach den experimentellen Ergebnissen läßt sich darüber hinausgehend vermuten, daß die mechanische Stabilität der Lendenwirbelsäule auch nach Laminektomie und zusätzlicher Abtragung der Gelenkfacetten nicht wesentlich beeinträchtigt ist. Dieses müßte allerdings noch in einer klinischen Untersuchung bestätigt werden.

6. Zusammenfassung

Zur Klärung der Fragestellung, ob die Bandscheibe in mechanischer Hinsicht die Aufgabe auch vollständig fehlender Wirbelgelenke mit übernehmen kann, wurden an 27 menschlichen Lendenwirbelpräparaten unter schrittweiser Abtragung der Wirbelbögen Kompressionsversuche in den vier Hauptbewegungsrichtungen der menschlichen Lendenwirbelsäule durchgeführt.

Bei den Versuchen kam es in keinem Falle, auch nicht bei vollständiger Wirbelbogenabtragung, zum Abrutschen zweier Wirbelkörper voneinander. Bereits bestehende Verschiebungen zeigten keine Tendenz zur Zunahme (II,6; III,4). Wenn durch den Versuch verursachte Verschiebungen beobachtet wurden, dann nur in den Fällen, in denen das Präparat aus versuchstechnischen Gründen zusätzlich abgesägt werden mußte; dabei erhielt der betreffende Wirbelkörper in beiden Fällen eine Keilform, die den Kompressionsdruck zum Teil von der Bandscheibe ablenkte (I,4,7).

Ebenso wurden keine Diskushernien beobachtet, allenfalls eine nur wenig verstärkte Vorwölbung des Diskus ohne wesentliche Einengung des Foramen intervertebrale (II,5,8). Diese Veränderungen waren zum Teil auch auf den Leeraufnahmen schon zu sehen und zeigten dann auch eine leichte Tendenz zur Zunahme (I,4; III,8). An den Gelenkspalten waren häufiger leichte Veränderungen im Sinne einer Formveränderung zu sehen, aber kein Abrutschen der Gelenkflächen voneinander; die artikulierenden Flächen waren nicht verändert (II,1,4,6; III,4; IV,1 bis 4).

Frakturen wurden häufiger gefunden. Das beobachtete Spektrum reicht von leichten Impressionen der Weichteile und Knochen (I,2; II,1,4, 6,8; III,1) über eine vor allem ventral beobachtete Erniedrigung der Wirbelkörper ohne Absprengung eines Fragmentes (III,5,6) bis zur echten Fraktur mit röntgenologisch erkennbaren Fragmenten (III,7,8; IV,4). In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, daß in den drei letztgenannten Fällen die Präparate einer unphysiologischen Belastung ausgesetzt waren.

Sonstige pathologische Veränderungen waren trotz des zum Teil deutlich sichtbaren Kompressionseffektes nicht nachweisbar.

III ANHANG

Literaturverzeichnis

BRADFORD,F., R. G. SPURLING: The Intervertebral Disc. Thomas, Springfield/III 1945; deutsch: Die Bandscheibe. Discus intervertebralis. Enke, Stuttgart 1950

BUSCH, H. D., W. G. HORTON, D. L. SHARP, A. TAYLOR: Fluid content of the nucleus pulposus as a factor in the disc syndrome. Brit. med. J. 1956/II, 71

COVENTRY, M.: Anatomy of the intervertebral disc. Clin. Orthop. 67(1969) 9

EISENHART, J. L.: Development of the vertebral column as related to certain congenital and pathological changes. Surg. Gynec. Obstet. 76(1943) 516

FRANK, A. P. H.: Fehlstellungen der Wirbelsäule nach Laminektomien. Med. Diss. Tübingen 1970

GROH, H.: Die Belastung der Bandscheiben der Wirbelsäule. Dtsch. Ärztebl. 65(1967) 714

GÜNTZ, E.: Die Kyphose im Jugendalter. In: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 2, hrsg. von H. Junghanns. Hippokrates, Stuttgart 1957

HARTMANN, F.: Pathophysiologie der Zwischenwirbelscheibe. In: Wirbelsäule und Nervensystem, hrsg. von E. Trostdorf, H. St. Stender. Thieme, Stuttgart 1970

HASSLER, O.: The human intervertebral disc. Acta orthop. scand. 40(1969) 765

HERBERT, J.J.: Lombalgies, étude mécanique; traitements orthopédiques et chirurgicaux. Rhumatologie 5(1953) 295

HIRSCH, C.,F.SCHAJOWICZ : Studies on structural changes in the lumbar anulus fibrosus. Acta orthop. scand. 22 (1952-53) 184

HORTON, W. G.: Further observations on the elastic mechanism of the intervertebral disc. J. Bone Jt. Surg. 40B (1958) 552

HOVELACQUE, A.: Le nerf sinu-vertébral. Ann. Anat. path. 2 (1925) 455

IDELBERGER, K. H.: Lehrbuch der Orthopädie. Springer, Heidelberg 1977

JACKSON, R. K.: The long term effects of wide laminectomy for lumbar disc excision. A review of 130 patients. J. Bone Jt. Surg., 53-B (1971) 609-616

JUNGE, H.: Kontrastdarstellung im Bereich der Wirbelsäule. In: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 4, hrsg. von H. Junghanns. Hippokrates, Stuttgart 1957

JUNGHANNS, H.:Die gesunde und die kranke Wirbelsäule in Röntgenbild und Klinik. 5. Aufl. Thieme, Stuttgart 1968

KÄLLÉN, J.: Biomechanische Veränderungen im lumbalen Bewegungssegment. In: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 58, hrsg. von H. Junghanns. Hippokrates, Stuttgart 1973b

LINDBLOM, K.: Technique and results in mycelography and disc puncture. Acta. radiol. (Stockh.) 34 (1950) 322

LINDEMANN, K. , H. KUHLENDAHL: Die Erkrankungen der Wirbelsäule. Enke, Stuttgart 1955

MATTHIASS,H.-H.: Arbeitshaltung und Bandscheibenbelastung. Arch. orthop. Unfall-Chir. 48(1956) 147

MORRIS, J. M., D. B. LUCAS, B. BRESLER: The role of the trunk in stability of the spine. J. Bone Jt. Surg. 43 A (1961) 327

MULLIGAN, J. M.: The innervation of the ligaments attached to the bodies of the ligaments attached to the bodies of the vertebrae. J. Anat. (Lond.) 91(1957) 455

MÜNCHINGER,K.: Die auf die Wirbelsäule wirkenden mechanischen Kräfte. In: Rheumatismus in Forschung und Praxis, Bd. II, hrsg. von W. Belart. Huber, Bern 1964 (S. 156)

NACHEMSON, A.: In vivo discometry on lumbar discs with irregular nucleograms. Some differences in stress distribution between normal and moderately degenerated disc. Acta. orthop. Scand. 36 (1965b) 418

NACHEMSON, A., J. M. MORRIS: In vivo measurements of intradiscal pressure. J. Bone Jt. Surg. 46 A (1964) 1077

NAYLOR, A.: Late results of laminectomy dor lumbar disc prolapse. A review after ten to twenty-five years. J. Bone Jt. Surg., 56 B (1974) 17 - 29

OHUSHIMA, H.: Study on hydronamic pressure of lumbar intervertebral disc. Arch. jap. Chir. 39 (1970) 45

RAUH, V. I.,I. SAUER, H. JAHN, W. RIDS: Zum Einfluß des Übergewichts auf die Belastbarkeit des Stütz- und Bewegungssystems von Frauen. Zeitschr. f. ges. Inn. Med., 30 (1975) 494 - 498

REICHAUER, F.: Untersuchungen über den lumbalen und cervikalen Wirbelbandscheibenvorfall. Thieme, Stuttgart 1979

ROOFE, P.: Innervations of anulus fibrosus and posterior longitudinal ligament. Arch. Neurol. Psychiat. 44(1940) 100

SCHLÜTER, K.: Form und Struktur des normalen und des pathologisch veränderten Wirbels. In: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 30, hrsg. von H. Junghanns. Hippokrates, Stuttgart 1965

STILLWELL, D. L.: The nerve supply of the vertebral column and its associated structures in the monkey. Anat. Rec. (1956) 125

TÖNDURY, G.: Zur Anatomie und Entwicklungsgeschichte der Wirbelsäule mit besonderer Berücksichtigung der Altersveränderungen der Bandscheibe. Schweiz. med. Wschr. 85 (1955) 825

TSUKADA, K.: Histologische Studien über die Zwischenwirbelscheiben des Menschen. Mitt. med. Akad. Kyoto 25 (1939) 207

WALDEYER, A.: Anatomie des Menschen, Bd. I, 6. Aufl. (1969) Walter de Gruyter, Berlin

WIBERG, G.: Back pain in relation to the nerve of intervertebral disc. Acta orthop. scand. 19 (1949) 211

WYSS, Th., S. P. ULRICH: Die gezielte Extensionsbehandlung der Wirbelsäule bei Arm-, Kreuz- und Ischiasschmerzen. Z. Orthop. 83 (1953) 497

LEBENSLAUF

Geboren am 23. November 1952 in Dortmund
Eltern : Alfred Mai
Brunhilde Mai, geb. Ständeke

1959 - 1963	Besuch der Mörike-Volksschule in Dortmund-Somborn
1963 - 1971	Besuch des Max-Planck-Gymnasiums in Dortmund
Mai 1971	Reifeprüfung
WS 1971/72	Studium der Rechtswissenschaften an der Universität Bochum
SS 1972	Beginn des Studiums der Medizin an der Universität Düsseldorf
April 1973	Naturwissenschaftliche Vorprüfung
Aug. 1974	Ärztliche Vorprüfung
Aug. 1975	1. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
Aug. 1977	2. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
Okt. 1977	Beginn des Praktischen Jahres im Bethesda-Krankenhaus in Duisburg
Okt. 1977	Eheschließung mit Birgitta Linnhoff
Okt. 1978	3. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
Seit Nov. 1978	Assistenzarzt in der Anästhesieabteilung des Bethesda-Krankenhauses in Duisburg

FOTODRUCK J. MAINZ – Telefon: (02 41) 2 73 05
Neupforte 13, Nähe Markt, 5100 Aachen